

学校编码: 10384

分类号\_\_\_\_\_密级 \_\_\_\_\_

学 号: 200224004

UDC\_\_\_\_\_

厦 门 大 学  
硕 士 学 位 论 文

两种不同工质的布雷顿制冷循环  
性能特性的研究

Investigation on the Performance Characteristics of the  
Brayton Refrigeration Cycles Working with Two  
Different Working Substances

杨 宇 霖

指导教师姓名: 陈 金 灿 教授

专 业 名 称: 理 论 物 理

论文提交日期: 2 0 0 5 年 4 月

论文答辩日期: 2 0 0 5 年 6 月

学位授予日期: 2 0 0 5 年 月

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_

评 阅 人: \_\_\_\_\_

2005 年 4 月

## 厦门大学学位论文原创性声明

兹呈交的学位论文，是本人在导师指导下独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考的其他个人或集体的研究成果，均在文中以明确方式标明。本人依法享有和承担由此论文而产生的权利和责任。

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学博硕士论文摘要库

## 摘 要

布雷顿制冷循环是一个基本的热力学循环，它在普冷和深冷领域得到了越来越广泛的应用。同时，对布雷顿制冷循环的研究将有利于空间和宇航制冷技术的发展。像其它热力学循环一样，对于布雷顿制冷循环的理论研究，也是从完全理想化的模型开始的，随后逐渐把实际循环中的各种因素，诸如绝热不可逆、回热、热漏等因素包括到循环模型中去，使理论循环模型符合于实际系统。随着布雷顿制冷循环在不同领域的应用，建立不同工质的循环模型，揭示各种不可逆性对布雷顿制冷循环性能的影响，正成为热力学循环理论研究的一个新课题。

本文研究分别以理想玻色气体和以满足居里定律的顺磁盐为工质的量子布雷顿制冷循环和磁布雷顿制冷循环的性能。在第二和第三章中，建立两种量子布雷顿制冷循环模型，利用理想玻色气体的热力学性质讨论理想玻色气体的量子简并性和循环中的不可逆性对布雷顿制冷循环的输入功、制冷系数、制冷量等重要参数的影响，导出不同情况下循环的性能特性。在第四章中，建立了一个以顺磁盐为工质的回热式不可逆布雷顿制冷循环模型，研究了在两个等磁场强度过程中的回热和两个绝热过程中的不可逆性对循环性能的综合影响，得到了最小磁场强度比和最佳磁场强度比的下限以及循环的一些优化判据，并对几种极限条件下循环的性能特性作了讨论。本文得到的结果不仅对于布雷顿制冷循环的进一步研究有着重要的促进作用，而且对于布雷顿制冷循环的设计也有着一定的理论指导意义。

**关键词：** 布雷顿制冷循环；不可逆性；性能特性

厦门大学博硕士论文摘要库

## ABSTRACT

The Brayton refrigeration cycle is one of the fundamental thermodynamic cycles, which is used in the refrigeration and cryogenic fields more and more widely. Moreover, the research of the Brayton refrigeration cycle will be helpful to the development of space and astronavigation refrigeration technology. Like other thermodynamic cycles, the complete idealized cycle model is first used to investigate the performance of the Brayton refrigeration cycle, and then the various irreversible factors existing in real cycles, such as adiabatic irreversibility, regeneration, heat leak, and so on, are considered by little and little, so that the theoretical model of the cycle approximates to real systems. With the application of the Brayton refrigeration cycle to the different fields, it is becoming a fresh topic of the theoretical research of thermodynamic cycles to establish the models of the Brayton refrigeration cycle working with the different working substances and reveal the influence of the various irreversibilities on the performance of the cycle.

In this thesis, the performance of the quantum Brayton refrigeration cycle working with ideal Bose gas and the magnetic Brayton refrigeration cycle working with paramagnetic salt described by Curie law is studied, respectively. In chapters 2 and 3, two models of the quantum Brayton refrigeration cycle are established. The thermodynamic properties of an ideal Bose gas are used to discuss the influence of the quantum degeneracy of the Bose gas and the irreversibilities in the cycle on some important performance parameters, such as the work input, coefficient of performance, refrigeration load, and so on, of the Brayton refrigeration cycle and the performance characteristics of the cycle

operating in the different cases are revealed. In chapter 4, the model of an irreversible regenerative Brayton refrigeration cycle working with paramagnetic salt is established. The synthetic influence of the regeneration in two iso-magnetic processes and the irreversibilities in two adiabatic processes on the performance of the cycle is investigated. The minimum ratio of two magnetic fields, the lower bound of the optimal ratio of the two magnetic fields and several optimal criteria of the regenerative magnetic Brayton refrigeration cycle are obtained. Moreover, the performance characteristics of the cycle under several limit cases are discussed. The results obtained in this thesis may not only play an important promotion role for the further investigation of the Brayton refrigeration cycle but also have theoretical instructive significances for the design of the Brayton refrigeration cycle

**Key words:** Brayton refrigeration cycle; irreversibility; performance characteristic

# 目 录

## 第一章 引言

§ 1.1 布雷顿制冷循环的发展和研究现状	1
§ 1.2 本论文的研究内容和安排	3
参考文献	4

## 第二章 不可逆量子布雷顿制冷循环的性能分析

§ 2.1 理想玻色气体的热力学性质	9
§ 2.2 不可逆布雷顿制冷循环模型	15
§ 2.3 循环的一般性能特性	18
§ 2.4 特殊条件下的循环性能特性	23
§ 2.5 结论	25
参考文献	26

## 第三章 回热式量子布雷顿制冷循环的性能分析

§ 3.1 回热式量子布雷顿制冷循环模型	28
§ 3.2 几个重要的参数	29
§ 3.3 循环的一般性能特性	31
§ 3.4 特殊条件下的循环性能特性	36
§ 3.5 结论	40
参考文献	40

## 第四章 磁布雷顿制冷循环性能的优化分析

§ 4.1 顺磁质的热力学性质	42
§ 4.2 不可逆磁布雷顿制冷循环模型	44
§ 4.3 三个重要的热力学参数	46



§ 4.4 循环的一般性能特性和优化判据·····	47
§ 4.5 特殊条件下的循环性能特性·····	55
§ 4.6 结论·····	59
参考文献·····	60

## 第五章 结束语

附 录

致 谢

## Contents

### Chapter 1 Introduction

1.1 Development and current status of the Brayton refrigeration cycle .....	1
1.2 Outline of the thesis .....	3
References .....	4

### Chapter 2 Analysis on the performance of an irreversible quantum Brayton refrigeration cycle

2.1 Thermodynamic properties of an ideal Bose gas .....	9
2.2 Model of an irreversible Brayton refrigeration cycle .....	15
2.3 General performance characteristic of the cycle .....	18
2.4 Performance characteristics of the cycle under special cases .....	23
2.5 Conclusions .....	25
References .....	26

### Chapter 3 Analysis on the performance of a regenerative quantum Brayton refrigeration cycle

3.1 Model of a regenerative quantum Brayton refrigeration cycle .....	28
3.2 Several important parameters .....	29
3.3 General performance characteristics of the cycle .....	31
3.4 Performance characteristics of the cycle under special cases .....	36
3.5 Conclusions .....	40
References .....	40

## **Chapter4 Optimum analysis on the performance of a magnetic**

### **Brayton refrigeration cycle**

4.1 Thermodynamic properties of paramagnetism .....	42
4.2 Model of an irreversible magnetic Brayton refrigeration cycle.....	44
4.3 Three important thermodynamic parameters.....	46
4.4 General performance characteristics of the cycle and its optimum criteria.....	47
4.5 Performance characteristics of the cycle under special cases.....	55
4.6 Conclusions.....	59
References.....	60

## **Chapter 5 Summary**

### **Appendix**

### **Acknowledgements**

## 第一章 引言

### § 1.1 布雷顿制冷循环的发展和研究现状

工业的发展，社会的进步，都离不开能源。纵观全世界社会经济发展的历程，每一次重大的经济飞跃和产业革命都是首先有了新的能源和动力装置的突破。18 世纪，蒸汽机引起西方产业革命，煤炭代替薪柴成为主要原料；19 世纪 70 年代，电力应用普及，实现了资本主义工业化；20 世纪中期，发达国家大量开发利用了石油和天然气，带来了西方经济的“黄金时代”。因此，能源的利用必将影响着社会发展。为了更有效地利用能源，就必须对利用能源的装置进行理论研究，热力学循环的理论研究是最重要的研究课题之一。最早研究的热力学循环模型是卡诺循环模型。通过对可逆卡诺热机的研究导出了卡诺效率  $\eta_c = 1 - T_L / T_H$ ，确定了工作在高温热源和低温热源之间的所有热机效率的上限。然而实际的热力学循环总是不可避免地受到不可逆因素的影响，因此后来的研究就是围绕着这一问题展开，并获得了很多重要的结论。布雷顿循环就是一种典型的热力学循环模型，它无论在动力循环还是在制冷循环中都得到了广泛的应用，它的理论发展过程与卡诺循环相似，最初的布雷顿循环模型是建立在完全可逆的理想情况下的。随着理论的发展，更趋近实际的不可逆布雷顿循环模型不断出现。例如 Kao 和 Wu<sup>[1, 2]</sup>等学者引入压强机和涡轮机的不可逆损失，建立了不可逆布雷顿循环模型，讨论了不可逆因素对循环性能的影响。在此基础上，Chen 等<sup>[3, 4]</sup>引进循环压力比这一参数，导出了功率、效率和压力间的解析式。Cheng 等<sup>[5, 6]</sup>则考虑了包含高低温热源之间热漏的不可逆布雷顿循环模型，对循环的功率和效率进行了优化，分析了各种不可逆性及高低温换热

器热导率分配对循环性能的影响。此外，工程上还常考虑回热不可逆性，也是学术界和工程界研究的一类重要的课题<sup>[7-11]</sup>。总之，由可逆到不可逆的发展是所有热力学循环研究的共同发展轨迹，也是理论模型不断逼近实际情况的一种发展趋势，布雷顿循环也不例外。

所有的热力学循环都有一个共同的特点，就是循环进行必须要有媒介参与，也就是工作物质，简称为工质。随着科技的发展和热力学循环的广泛应用，各种不同的循环工质相继被应用。例如最早的循环模型是以理想气体为工质，但是随着低温技术的进一步发展，工作在更低温度范围的制冷系统应运而生，在这种低温环境下，理想气体制冷机循环模型将不再适用，因为此时的气体工质在低温下的量子特征是明显的，在此条件下就必须考虑了工质的量子特性，相应的循环性能特性也就大不一样，于是就有了量子循环模型。像经典热力学循环一样，量子热力学循环也有不同的循环形式，比如以理想玻色气体和理想费米气体为工质的量子布雷顿制冷循环。这是近来刚刚引起人们关注的课题<sup>[12-14]</sup>，但是主要集中在几种典型的可逆热力学循环模型<sup>[15-18]</sup>，如卡诺循环模型、斯特林循环模型、埃里克森循环模型和奥托循环模型等热力学循环模型，重点是分析量子气体的简并性对循环性能的影响。而在实际的热力学循环中，不可逆因素是存在的，因此在循环研究中考虑了不可逆因素是有实际意义的。布雷顿制冷循环是重要的制冷循环，也是应用空间领域内热力学循环性能系数最好的制冷循环之一，美国的 NASA 公司与 Creare 公司已经研究出制冷温度 4.2K-70K，制冷量 1-5W，寿命大于 5 年的布雷顿制冷机，而且工程方面也获得了一定的成功，已经将其用到哈勃望远镜装置上<sup>[19]</sup>。因此研究不可逆的量子布雷顿制冷循环将具有重要的现实意义。对于制冷循环还有另一种重要的循环工质即磁工质，它的独特优点是制冷效率和可靠性都优于传统的气体制冷机而且还可以减少环境污染。早在 1933 年 Giauque 就利用磁热效应进行了

绝热去磁化制冷的实验，并取得了约 1K 的温度下降，从而获得了诺贝尔化学奖，随后，许多科学家致力于磁制冷的研究<sup>[20, 21]</sup>。在 1954 年，Heer 等人研制出第一台半连续的磁制冷机，使得温度下降了 0.2K<sup>[21]</sup>，20 世纪 70 年代以后，磁制冷机的研制已经成为对于许多科学家极具吸引力的研究领域，例如青木亮三采用 0.67 特斯拉的永久磁铁，使室温下降了 0.46K<sup>[22]</sup>。根据磁制冷的特点和应用温区，磁制冷的温区一般可分为三部分：深低温磁制冷（15K 以下）、低温磁制冷（15K 到室温以下）和室温磁制冷，在不同的温区根据需要可采用不同的制冷循环。目前，工作在不同温区的磁制器的实验研究已经被广泛地开展<sup>[23-28]</sup>，不仅如此，各种磁制冷循环的理论分析和优化设计已经引起了许多研究者的注意，并成为低温技术领域的一个热门课题<sup>[29-40]</sup>。然而，目前关于磁制冷的大部分研究还是集中在卡诺制冷循环、斯特林制冷循环和埃里克森制冷循环等几种热力学循环。虽然布雷顿制冷循环也是一个重要的、典型的热力学循环，并广泛地应用在各种制冷领域，但是关于磁布雷顿的制冷循环的研究却很少，尤其是考虑了不可逆性的磁布雷顿制冷循环的研究更少<sup>[37, 39]</sup>。因此继续深入开展这方面的工作显得十分必要和有意义。

## § 1.2 本论文的研究内容和安排

本论文研究的对象是两种非常规工质的布雷顿制冷循环，首先研究了两种不同工质的热力学性质，接着建立布雷顿制冷模型，再根据工质的性质并结合循环模型，综合地考虑布雷顿循环制冷循环的绝热不可逆性和回热特性，讨论循环的一般性能特性，并推导出在各极限条件下循环的性能特性。

第二章和第三章是研究理想玻色气体为工质的布雷顿制冷循环，利用

热力学理论算出制冷量、制冷系数和输入功等表征性能参数的表达式，并确定循环运行的最小压强比，再以 $^4\text{He}$ 为例计算了各个参量随压强比的变化关系。第四章是研究绝热不可逆的回热式布雷顿制冷循环。利用统计力学知识讨论了满足居里定律的顺磁质的热力学性质，运用类似第二章的方法研究了循环的性能特性，确定循环运行的最小磁场比和优化区间。本文所得的结果对于实际的布雷顿制冷循环的优化设计具有一定的理论指导意义。

## 参考文献

- [1] Kao C L, Wu C. Power performance of naval shipboard gas turbine [J]. Int. J. power Energy Syst., 1991,17:107-110.
- [2] Wu C, Kiang R L. Power performance of a nonisentropic Brayton cycle [J]. J. Energy. Gas Turbines power, 1991,113:501-504.
- [3] 陈林根, 孙丰瑞. 不可逆闭式布雷顿循环有限时间热力学性能的解析公式[J]. 电站系统工程, 1995,11,12-16.
- [4] Chen L, Sun F, Wu C. Performance analysis of an irreversible Brayton heat engine [J]. Int. Institute Energy, 1997,70:2-8.
- [5] Cheng C Y, Chen C K. Power optimization of an irreversible Brayton heat engine [J]. Energy Source, 1997,19:461-467.
- [6] Cheng C Y, Chen C K. Efficiency optimizations of an irreversible Brayton Heat engine [J]. Trans. ASME, J. Energy Res. Tech., 1998,120:143-148.
- [7] Calvo A H, Medina A, Roco J M M. Power and efficiency in a regenerative

- gas turbine [J]. J. Phys. D: Appl. Phys., 1995,28:2020-2023.
- [8] 陈林根, 孙丰瑞. 具有等熵压缩、膨胀过程的闭式燃气轮机回热循环有限时间热力学性能[J]. 燃气轮机技术, 1995,8,29-35.
- [9] Medina A, Rocco J M M, Hernandez C. Regenerative gas turbine at maximum power density conditions [J]. J. Phys. D: Appl. Phys., 1996,29:2802-2805.
- [10] Rocco J M M, Velasco S, Medina A, Calvo A H. Optimum performance of a regenerative Brayton thermal cycle [J]. J. Appl. Phys., 1997,82:2735-2741.
- [11] Chen L, Ni N, Cheng G, Sun F, Wu C. Performance analysis for a real closed regenerated Brayton cycle via methods of finite time thermodynamics [J]. Int. J. Ambient Energy, 1999, 20: 95-104.
- [12] Sisman A, Saygin H. J. On the power cycles working with ideal quantum gas: I. The Ericsson cycle [J]. Phys. D: Appl. Phys., 1999,32: 664-670.
- [13] Bender C M, Brody D C, Meister B K. Quantum mechanics Carnot engine [J]. J. Phys. A: Math. Gen. , 2000,33: 4427-4436.
- [14] He J Z, Chen J C, Hua B. Influence of quantum degeneracy on the performance of a Stirling refrigerator working with an ideal Fermi gas [J]. Appl. Energy, 2002,72: 541-554.
- [15] Opatrny T, Scully M O. Enhancing Otto-mobile efficiency via addition of a quantum Carnot cycle. Fortschr [J]. Phys., 2002,50: 657-663.
- [16] Saygin H, Sisman A. J. Quantum degeneracy effect of the work output from a Stirling cycle [J]. Appl. Phys., 2001,90: 3086-3089.
- [17] Sisman A, Saygin H. The improvement effect of quantum degeneracy on the work from a Carnot cycle. Appl [J]. Energy, 2001,68: 367-376.



Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库